

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

B2341 - Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Simulace chlazení vzduchem u vstřikovací formy

Simulation cooling with air for injection molds

Pavel Mozol
KSP – TP – B8

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Ausperger - *TU v Liberci*
Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Weinlich – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	42
Počet tabulek	3
Počet příloh	0
Počet obrázků	34
Počet grafů	5

Datum: 26.05.2006

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 Strojírenství

Diplomant: Pavel Mozol

Téma práce: Simulace chlazení vzduchem u vstřikovací formy
Simulation cooling with air for injection molds

Číslo DP: KSP-TP – B8

Vedoucí DP: Ing. Aleš Ausperger - *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Ing. Petr Weinlich – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Výběr vhodných temperačních médií je jedním z klíčových parametrů stabilních vstřikovacích procesů. Tato práce podává výsledky o vhodnosti resp. nevhodnosti využití vzduchu jako temperačního média, podpořené simulačním programem Cadmould. Zhodnocení zjištěných výsledků je provedeno s ohledem na rozložení teplotních polí na povrchu výrobku.

Abstract:

Assessment of acceptable colling medium is one of the most important parameter for stability injection processes. This study shows results about using air availability as cooling medium, boosted up by Cadould simulation. Conclusion is carried out in relation to thermal fields layout on the semiproduct surface .

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 26.05.2006

.....

Pavel Mozol
Na Radouči 1248
293 01 Mladá Boleslav

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomohli s touto prací. Ať už radou či potřebným podkladem pro zpracování či zadání hodnot do programu.

Jmenovitě rodičům za podporu při studiu, dále panu Ing. Aleši Auspergerovi za odborné rady při zpracování této práce. V neposlední řadě Ing. Jiřímu Gabrielovi za poskytnutí potřebného softwaru.

Obsah

OBSAH	5
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
ÚVOD /1/	8
1. TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ /2, 8/	9
1.1. LISOVACÍ NÁSTROJ – FORMA /3/	10
1.2. VTOKOVÁ SOUSTAVA /3/	11
1.3. TEMPEROVÁNÍ VSTŘIKOVACÍCH FOREM /4/	12
1.4. TEMPERAČNÍ SOUSTAVA /4/	12
1.4.1. PLOCHÉ PŘEPÁŽKY /2/	14
1.4.2. TEMPEROVÁNÍ FONTÁNKOVÉ (S TRUBIČKOU) /2/	15
1.5. TEMPERAČNÍ MÉDIUM /4/	15
2. VÍROVÁ TRUBICE /5/	16
2.1. FENOMÉN VÍROVÉ TRUBICE /5/	16
2.2. POPIS ČINNOSTI /5/	16
3. PROČ PROVÁDĚT SIMULACI VSTŘIKOVÁNÍ /6/	17
3.1. GEOMETRIE PLASTOVÉHO MODELU /6/	18
3.2. SIMULACE PLNÍČÍ FÁZE /6/	18
4. CADMOULD - SOFTWARE PRO SIMULACI VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ /7/	18
4.1. CADMOULD RAPID /7/	19
4.2. CADMOULD FILL /7/	19
5. EXPERIMENT	21
5.1. TVORBA MODELU FORMY V CADMOULD	21
5.2. TVORBA VTOKOVÉ SOUSTAVY	22

5.3. TVORBA TEMPERAČNÍ SOUSTAVY.....	23
5.4. NASTAVENÍ PARAMETRŮ VSTŘIKOVACÍHO CYKLU.....	26
5.5. VLASTNOSTI TEMPERAČNÍHO MÉDIA.....	27
5.6. NASTAVENÍ PARAMETRŮ CHLADÍČÍHO MÉDIA	29
5.7. TERMOKAMERA THERMACAM P65 /2/	30
6. POVRCHOVÁ TEPLOTA	32
7. ZHODNOCENÍ.....	38
8. ZÁVĚR.....	39

Seznam použitých zkratk

CAD	aplikace konstrukčních programů
CAM	aplikace pro obrábění dílů
CAE	aplikace simulačních programů
ČSN	česká státní norma
IGES	formát souborů z konstrukčních programů
VDA	formát souborů z konstrukčních programů
STL	formát souborů z konstrukčních programů
GmbH	společnost s ručením omezeným
FEM	síť konečných prvků
BMP	formát souboru obrázku
PNG	formát souboru obrázku
JPEG	formát souboru obrázku
AVI	formát souboru videa
USB	typ konektoru propojení počítače a jeho příslušenství, dalšího zařízení
c_p	měrná tepelná konstanta při stálém tlaku (kg/m^3)
l	měrná tepelná vodivost (kJ/kg.K)
ρ	hustota látky (g/cm^3)
ν	kinematická viskozita (m^2/s)
t	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
PP	polypropylen
PC	osobní počítač

Úvod /1/

Plastické hmoty se od padesátých let dvacátého století zařadily mezi rovnocenné a v mnohých případech nepostradatelné konstrukční materiály ve všech průmyslových oborech. Zdařilé uplatnění plastů pro konstrukční účely je podmíněno jejich specifickými vlastnostmi. Velice výhodná je jejich měrná hmotnost (4-8x menší než oceli) a u některých druhů i vysoká odolnost proti agresivním chemickým prostředím. Nelze opomenout velmi dobré elektroizolační, dielektrické a tepelně izolační vlastnosti. V současné době se připravují plasty podle předem definovaných požadavků na vlastnosti, což vede k rychlému zvyšování objemu a kvality výroby.

Stále rostoucí požadavky na kvalitu a rozměrovou přesnost plastových výlisků vedou konstruktéry ke stále progresivnějšímu a ekonomičtějšímu přístupu při projektování. Neocenitelným pomocníkem návrhu nových výrobků a výrobního nářadí jsou CAD/CAM/CAE počítačové programy.

Designéři plastových dílců mohou účinně využít designérské konstrukční programy pro tvorbu a estetické hodnocení navrhovaných součástí. Konstruktéři vstřikovacích forem, lisovacích forem a dalšího nářadí pracují s CAD programy, které výrazně zrychlují netvůrčí část konstruktérské práce a umožňují mediální přenosy konstrukcí, což usnadňuje oboustrannou komunikaci. CAM programy vytvořené zkušenými odborníky řadí výrobu přesných a složitých tvarových dutin výrobního nářadí. K dalšímu urychlení výroby přispívají systémy rámů forem, které dodávají renomovaní výrobci ve velmi krátkých lhůtách. Technologové vstřikoven, které jsou vybaveny například novými vstřikovacími stroji řízenými počítači, mohou zajistit vysokou reprodukovatelnost technologických parametrů, případně jejich doregulování na základě měření vstřikovacího tlaku, vnitřního vstřikovacího tlaku, hmotnosti součásti apod., a to i při rychlém výrobním cyklu. Programy pro simulování procesů vstřikování se značí jako CAE systémy.

Úkolem této bakalářské práce bylo zhodnocení vhodnosti použití vzduchu jako temperačního média za pomoci simulačního systému CAE. Přesněji s použitím programu Cadmould.

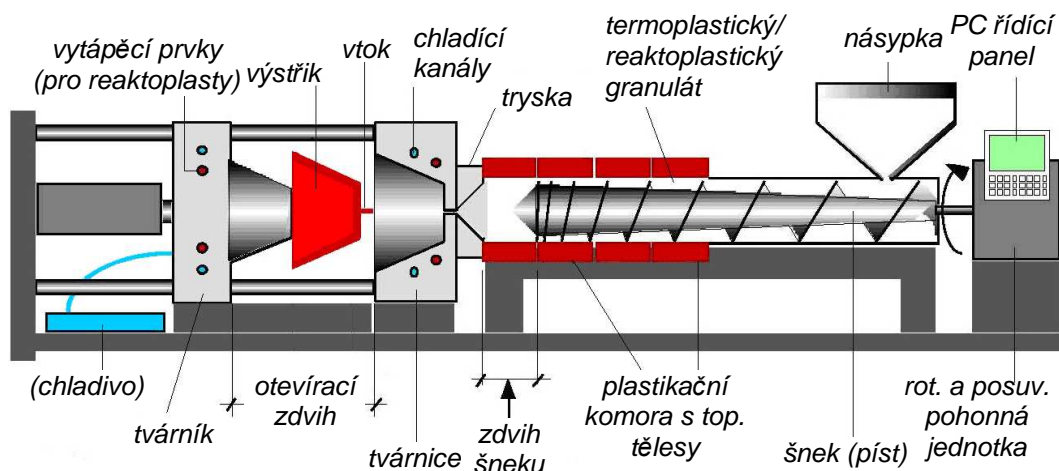
1. Technologie vstřikování /2, 8/

Vstřikování je jednou z hlavních operací při zpracování plastů. Umožňuje produkovat kvalitní a dostatečně přesné výrobky s výstřiky – ze širokého sortimentu plastů.

V současnosti se vstřikováním zpracovává přibližně 80% polymerů, přičemž význam této technologie stále roste. Vstřikování patří k jedinému ze způsobů tváření, kde dávka roztaveného plastu je vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek.

Základem pro tuto technologii je vstřikovací stroj (obr. 1 vstřikovací stroj), jehož hlavní část se nazývá plastikační jednotka, kterou tvoří tavící komora ve šneku. Šnek se nachází pod násypkou vstřikovacího stroje. Otáčivým pohybem protlačuje materiál do tavící komory. Současně se šnek posouvá dozadu, protože roztavená hmota se hromadí před čelem šneku. Při dostatečném množství materiálu se šnek zastaví, uzavře se forma a tavící komora dosedne na formu. K plnění dutiny formy dojde dopředním pohybem šneku. Forma je kovová a chlazená na 30 - 80°C. Chladí ji médium, kterým nejčastěji bývá voda. Po dokonalém ztuhnutí taveniny plastu se forma otevře a vyjme se výrobek.

Zařízení pro vstřikování plastů se dále skládá z regulační a řídicí soustavy. Vstřikovací stroj má na sobě dvě závislé jednotky: vstřikovací a uzavírací jednotku. Úkolem vstřikovací jednotky je zajistit přesné dávkování granulátu, jeho plastikaci, vstříknutí roztavené hmoty do formy. Provedení dotlaku a zajištění přísunu a odsunu tavící dutiny k formě. Posuv šneku či celé jednotky je hydraulický. Vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost se regulují množstvím a tlakem přiváděné hydraulické kapaliny. Uzavírací jednotka stroje zajišťuje pevné uzavření vstřikovací formy během plnění a všechny pohyby formy nutné k vyhození hotového výrobku z formy. Regulační a řídicí jednotky zabezpečuje poloautomatický nebo plně automatický provoz stroje a samočinné dodržování technologických parametrů. Programovací část je umístěna v samostatné ovládací skříni. Hydraulická část je v loži stroje. Podle ČSN se výrobek získaný vstřikováním nazývá výstřik.



Obr. 1: Schéma vstřikovacího stroje /2/

1.1. Lisovací nástroj – forma /3/

S rozvojem využití plastů ve společnosti vzrůstají nároky na technologie umožňující zpracování plastů. Jednou z těchto technologií je i vstřikování termoplastů, kdy se roztavená hmota vstřikuje do tvarové dutiny formy – lisovacího nástroje.

Lisovací nástroje pro vstřikování termoplastů, od nejjednodušších až po nejsložitější, od nejmenších až po ty největší, musí splňovat pro svůj správný chod několik základních funkcí. Tvarová dutina musí přesně odpovídat požadovanému tvaru výlisku, forma musí zajistit co nejrychlejší temperaci výlisku na požadovanou teplotu podle použité technologie zpracování daného plastu a v neposlední řadě umožnit správné a rychlé vyjmutí výlisku z dutiny formy.

Formy se skládají zpravidla ze dvou hlavních částí, z nichž jedna je upnutá na pevné straně vstřikovacího stroje a druhá na jeho pohyblivé straně. Část upnutá na pevné straně se obvykle nazývá tvárnice a její hlavní funkcí je zajištění přívodu taveniny do dutiny formy, a to pomocí vtokového systému. Část upnutá na pohyblivé straně vstřikovacího stroje se většinou nazývá tvárník a její hlavní funkcí je zajištění správného vysunutí výlisku z dutiny formy pomocí vyhazovacího systému formy. Obě části lisovacího nástroje pak současně zajišťují správnou temperaci výlisku před jeho vyjmutím z formy, a to pomocí systému temperačních rozvodů v každé části formy.

Každá forma je složena z několika desítek až stovek dílů. Pro správné odformování výlisků využívá konstruktér formy často i několik pohyblivých šíbrů nebo čelistí, jejichž pohyb je ovládán lisem při vlastním otevírání formy nebo přidavnými, např. hydraulickými

systémy. Vysunutí výlisku z dutiny formy pak zajišťuje soustava vyhazovačů upevněných ve vyhazovací desce, která je po otevření formy ovládána mechanismem vstřikovacího lisu. Dalšími částmi forem jsou pak rámy nebo upínací a opěrné desky včetně různého příslušenství, které mimo vlastní správné funkce formy umožňují připevnění formy do lisu a připojení formy k jednotlivým médiím.

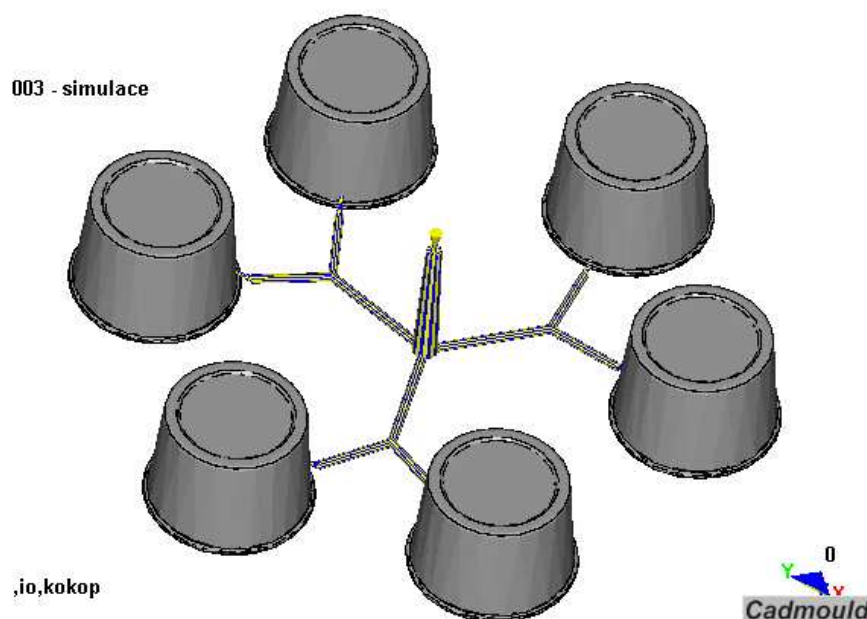
1.2. Vtoková soustava /3/

U jednonásobných forem: vtokový systém = vtok (ústí vtoku)

- Kuželový vtok
- Bodový vtok
- Deštníkový vtok
- Boční vtok
- Několikanásobný vtok
- Štěrbínový vtok

U vícenásobných forem : vtokový systém = vtok + rozváděcí kanály + ústí vtoku (viz obr. 2)

- Plné vtoky
- Boční vtoky
- Bodové vtoky



obr.2: vtoková soustavy u vícenásobné formy

1.3. Temperování vstřikovacích forem /4/

Formy při vstřikování je nutno chladit, přesněji řečeno temperovat. Způsob temperance ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti výrobku, přesnost rozměrů, dodržení a stálost tvaru, celkový vzhled a z toho vyplývající uživatelské vlastnosti.

Požadavky kladené na temperaci vstřikovacích forem:

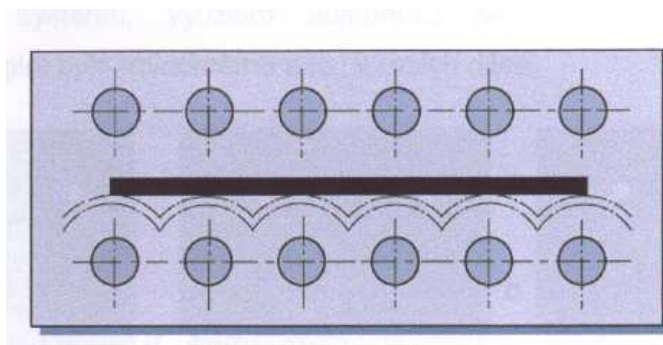
- Rychlý a bezproblémový ohřev vstřikovací formy na požadovanou teplotu a udržení této teploty během výroby v požadované toleranci
- Rychlý a rovnoměrný odvod tepla
- Dosažení vysoké kvality výstřiku (zabránění rozměrovým změnám)
- Zabránit nežádoucím změnám mechanických vlastností
- Bezporuchový provoz a rychlá ekonomická návratnost

Hlavní úkoly temperace:

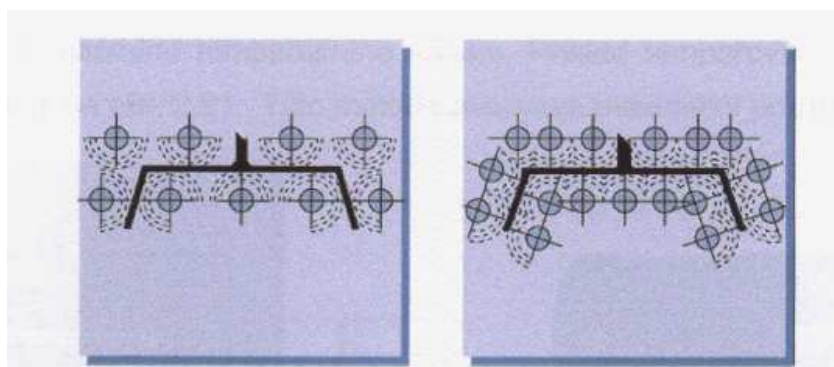
1. technologické hledisko
 - dosažení vysoké kvality výstřiků dosaženým rovnoměrným odvodem tepla z nástroje
2. ekonomické hledisko
 - hospodárnost výroby rychlým odvodem tepla z nástroje

1.4. Temperační soustava /4/

Volbou vhodné temperance získá výrobek požadovaný tvar a rozměr dané dutinou formy, hladký či drsný povrch, požadovanou jakost, pevnost, tvrdost, tuhost a jiné mechanické vlastnosti. V opačném případě je zvýšená pravděpodobnost předčasného místního zatuhnutí, nedotečení do vzdálených míst, zhoršení mechanických vlastností, což má za následek nekvalitní výrobu. Při nedostatečném zatuhnutí taveniny v dutině formy dochází při vyhazování nebo vyjímání výrobku z formy k snadnému mechanickému poškození, čímž se stává výrobek nepoužitelným.



Obr. 3: Základní rozložení temperačních kanálků kolem tvarové dutiny /2/



Obr. 4: Nevhodné (vlevo), vhodné (vpravo) rozložení temperačních kanálků kolem tvarové dutiny /2/

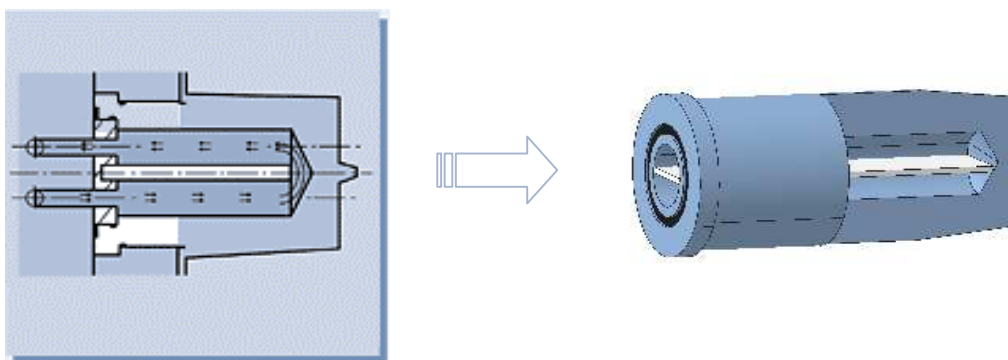
Temperance také ovlivňuje tepelné namáhání formy, její trvanlivost a životnost. Při optimálním řešení je vstřikovací forma minimálně tepelně namáhána, tím dochází ke zvyšování mechanického namáhání formy a forma má požadovanou trvanlivost a samozřejmě i výkon. Na temperaci závisí i doba vstřikovacího cyklu a z toho vyplývající ekonomičnost výrobního procesu. Rozhodující vliv na teplotu taveniny má průběh chlazení. Formy se běžně temperují vodou, která protéká chladícími kanály. Celkový povrch (teplostěnná plocha) těchto kanálků musí být takový, aby byl bezpečně zaručen odvod (přívod) požadovaného množství tepelné energie.

Abychom udrželi přibližně konstantní teplotu stěny formy, je nutno dodržovat tyto zásady:

- je třeba volit vhodnou konstrukci temperačních kanálů ve formě
- je třeba udržet pravidelný cyklus vstřikování
- je nutné měřit skutečnou teplotu stěn formy instalovanými čidly
- formu je třeba nepřímě temperovat temperačními přístroji.
- Temperační přístroje musí pracovat s dostatečným přetlakem a průtokem cirkulující vody a musí zaručit stabilní teplotu vody.

1.4.1. Ploché přepážky /2/

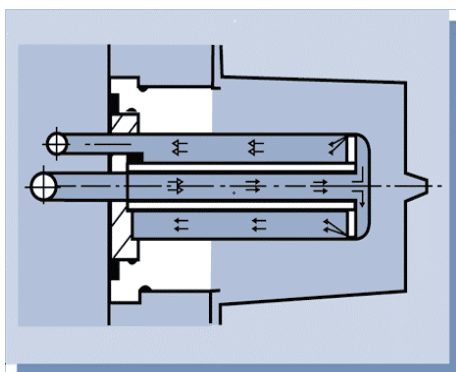
Přepážkové řešení je součástí chlazení, které dopravuje proud teplotného media do prostorů, které jsou špatně přístupné pro temperační kanály. Tato varianta s přepážkou je ve skutečnosti temperační kanál vyvrtaný kolmo na hlavní rozváděcí temperační kanál s kovovým plochým hranolem jako přepážkou, která separuje jeden temperační kanál kruhového průřezu na dva půlkruhové kanály. Tok teplotného media proudí po jedné straně přepážky z hlavního rozváděcího kanálu do dutiny, obtéká vrchol přepážky. Po opačné straně přepážky se medium vrací zpět do hlavního temperačního kanálu. Příklad temperování jader kanálem s přepážkou je na obr. 2.21. Tato metoda poskytuje maximální průřez temperačního kanálu pro tok media. Problém tohoto řešení je v obtížném ustavení přepážek tak, aby ploché hranoly byly umístěny v ose a dutinu dělily na dvě poloviny. Chladicí efekt a s tím i odvod tepla na jedné straně dutiny, či jádra, by mohl být rozdílný, než na straně opačné, což je nevýhodné pro výsledný napěťový stav konečného výstřiku.



Obr. 5: Temperování jader a dutin temperačním kanálem s přepážkou /2/

1.4.2. Temperování fontánkové (s trubičkou) /2/

Princip tohoto řešení chlazení dutin je podobný systému temperování s plochou přepážkou, ale u tohoto řešení je plochá přepážka nahrazena tenkou trubičkou zakončenou osazením. Teplonosné medium proudí do vrcholu dutiny uvnitř této trubičky a zpět do hlavního temperačního kanálu se vrací mezi vnější stěnou trubičky a vnitřní stěnou dutiny uvnitř jádra. Obtékání vrcholu připomíná jakoby „fontánku“ (viz. obr. 6).



Obr. 6: Temperování jader a dutin kanálem „fontánkové“ /2/

1.5. Temperační médium /4/

Takzvané chladicí médium protéká soustavou chladících kanálků a udržuje teplotu formy na žádané teplotě. Na rovnoměrnost teploty formy má vliv rozmístění a rozměry chladících kanálů, jakož i teplota a směr proudění chladiva. Důsledky nerovnoměrného chlazení se projevuje vnitřní pnutí výstřiku a kolísání vlastností na různých místech výrobku.

Proto by kanály měli mít průměr 8 až 15 mm. Vzdálenost od povrchu 25 až 40 mm a vzdálenost mezi jednotlivými kanály co nejmenší.

Množství proudící kapaliny určujeme tak, aby rozdíl teplot na vstupu a výstupu nepřekročil 5° C. Rychlost proudění musí být taková, aby bylo zajištěno turbulentní proudění, kdy je přenos tepla nejintenzivnější.

Chladivo přivádíme do nejvzdálenějšího místa od vtoku, protože hmota má tuhnout v dutině formy od vnějšího konce směrem k vtoku. Z tohoto důvodu není chlazení kolem vtoku tak intenzivní.

Nejčastější kapalinou pro chlazení bývá voda, které cirkuluje mezi formou a chladícím zařízením v uzavřeném okruhu. Jestliže požadujeme teplotu vyšší než 100°C, používáme k chlazení roztok glycerinu ve vodě nebo oleji.

2. Vírová trubice /5/

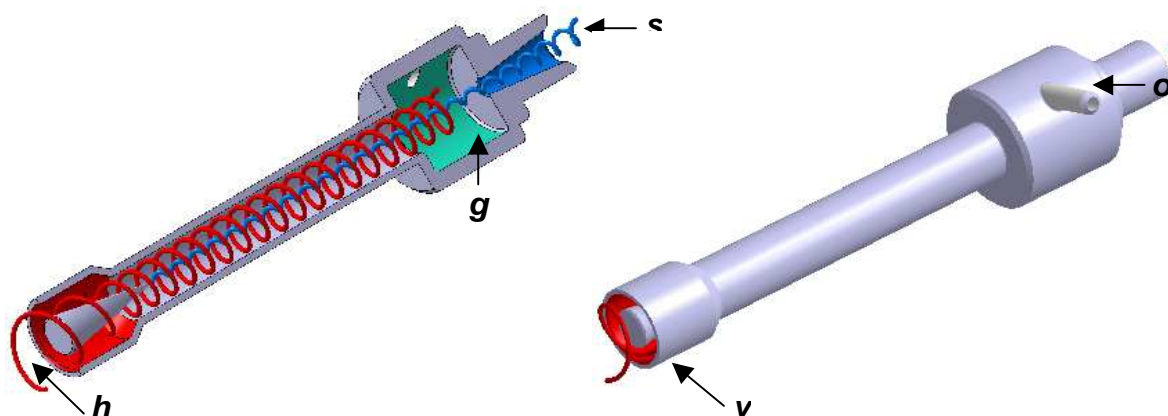
Vírové trubice řeší tisíce průmyslových problémů při chlazení nebo ohřívání použitím pouze stlačeného vzduchu jako zdroje síly. Vírová trubice upravuje obyčejný stlačený vzduch do dvou vzduchových proudů, jeden horký a druhý studený. Bez pohyblivých částí, bez elektrické energie, bez freonu mohou vírové trubice vyrábět chlazení až do 1758 W nebo teploty v rozsahu -46 °C až +100 °C použitím pouze filtrovaného stlačeného vzduchu o teplotě 20 °C a tlaku 6.9 bar. Řídící ventil na výfuku horkého vzduchu reguluje teploty a proudění v širokém rozsahu.

2.1. Fenomén vírové trubice /5/

První objev učinil úplně náhodou francouzský fyzik Georges Ranque v roce 1930, ve čtyřicátých letech se jevem zabýval v U.S.A. Rudolf Hilsch. V odborné literatuře bylo uveřejněno množství článků, ale princip vírové trubice je stále ještě pro mnohé nevysvětlitelný. Společnost VORTEC Corporation ze Cincinnati (Ohio, U.S.A.) byla první kdo vyvinul technologii pro využití vírové trubice v praxi - efektivní řešení chlazení a ohřívání v různých průmyslových aplikacích. Přes 30 let společnost VORTEC vyvíjí patenty a technologie pro rozšíření a vytříbení aplikací vírové trubice.

2.2. Popis činnosti /5/

Stlačený vzduch vstupuje do tangenciálně vrtaného stacionárního generátoru (kde dosahuje až rychlosti zvuku), který nutí vzduch rotovat trubici podél vnitřní stěny směrem k horkému řídícímu ventilu při rychlosti až 1.000.000 ot./min. Část tohoto vzduchu vystupuje přes jehlový ventil jako horký výfuk vzduchu. Zbývající vzduch je tlačén zpět středem proudu vzduchu, kde stále se točící se pohybuje pomalejší rychlostí při konání jednoduché (přirozené) výměny tepla. Vnitřní pomaleji se pohybující sloupec vzduchu nechává teplo vnějšímu rychleji se pohybujícímu sloupci vzduchu. Když pomalejší vnitřní sloupec vzduchu prochází středem stacionárního generátoru a vystupuje studeným výfukem, dosáhne extrémně nízké teploty.



o – vstupní otvor stlačeného vzduchu, g – stacionární generátor, v – jehlový ventil,
h – horký výstup plynu, s – studený výstup plynu

Obr. 7: Schématický náčrt Ranque–Hilsch vírové trubice se zjednodušeným znázorněním šroubových proudnic studeného a teplého plynu /2/

Množství a teplota studeného nebo horkého vzduchu vyráběná vírovou trubicí je řízena ventilem na horkém výfuku vzduchu. Vysoká studená frakce (tj. když více než 50 % vstupujícího vzduchu je propuštěno přes studený výfuk vzduchu) produkuje maximální účinnost - největší výstup tepla. To nastane u studené frakce 60 - 70 %, kde množství vzduchu propuštěného studeným výfukem a pokles teploty je optimalizován. Nízká studená frakce (tj. když méně než 50 % vstupujícího vzduchu je propuštěno přes studený výstup vzduchu) produkuje nejnižší teploty, ale s redukováným proudem vzduchu. Vyšší vstupní teploty, nadměrná vlhkost dodávaného vzduchu nebo nadměrný odpor v horkém i studeném výfuku budou redukovat chladicí provedení vírové trubice. Ideální činnost vírové trubice s konstantním vstupním tlakem a teplotou bude dodávat teploty udržované na ± 0.56 °C.

3. Proč provádět simulaci vstřikování /6/

Plastové dílce stále častěji můžeme považovat za nějaké druhořadé předměty, které po čase jednoduše vyhodíme. Musíme k nim přistupovat jako k náročným technickým dílcům, vyžadujícím plnou konstrukční a technologickou propracovanost. Tato orientace je podmíněna mj. i měnícími se technickými a ekologickými zákony. Rovněž značný konkurenční tlak a rostoucí komplexnost plastových dílců vyžaduje investovat více nákladů do vývojové a konstrukční fáze výroby, která naopak musí zajistit výhodné podmínky pro

ekonomickou sériovou výrobu. To vše při vysokých kvalitativních požadavcích na plastové dílce.

Samozřejmě ekonomické hledisko není jediné. Analýzy také přinášejí zvýšení užitných a vzhledových vlastností plastových dílců, zvláště pak u složitých konstrukcí nebo vícenásobných forem. Měli bychom si uvědomit, že je lepší simulací prověřit výrobu plastového dílce, než dodatečně zápasit s různými výrobními a technologickými problémy.

3.1. Geometrie plastového modelu /6/

Simulační program, jako je CADMOULD má vlastní konstrukční aparát. Stále častěji se však setkáváme s modely, jejichž geometrie se do simulačního programu přebírá z různých CAD systémů. Hlavní problém tohoto postupu neleží ani tak v přenosu pomocí interface IGES nebo VDA či STL, ale v převodu reálného modelu na skořepinový model. Ideální situace nastává tehdy, když uživatel CAD systému sám připraví model se skořepinovými plochami. Tím se výrazně sníží finanční a časové náklady na analýzu, neboť se může přímo přistoupit k síťování ploch metodou konečných prvků.

3.2. Simulace plnicí fáze /6/

Je základním výpočtem, který vypovídá nejen o časových, tlakových, smykových, teplotních a dalších závislostech během zaplňování tvarové dutiny taveninou plastu, ale stanovuje také rozsah „technologického okna“ při zpracování. Analýza přispívá k odstranění nebo přesunutí studených spojů, k dosažení rovnovážného zaplnění tvarové dutiny, k rovnoměrnější distribuci tlakových ztrát, k odstranění kritických oblastí dílce apod.

4. CADMOULD - software pro simulaci vstřikování plastů /7/

Jedná se o jednoduchou, rychlou a levnou simulaci vstřikování plastových dílců. Tento program vyvíjí německá firma Simcon GmbH a všem konstruktérům, designérům a technologům dokáže velmi rychle odpovědět na následující otázky :

- Je design plastového dílce navržen správně?
- Kam umístit vtokovou soustavu?
- Kolik vtoků je potřeba použít?

- Kde vzniknou studené spoje?
- Jaký bude vstřikovací tlak?
- Jaká bude doba chlazení dílce?
- Jaká bude potřebná přídržná síla stroje?

Z konstrukčních STL (stereolitografických) dat program **Cadmould** automaticky vygeneruje výpočetní síť konečných prvků (FEM) a podle zadané polohy vtoku, zvoleného materiálu a jeho technologických parametrů, zpracuje obvykle během několika minut simulační analýzu.

4.1. **Cadmould Rapid** /7/

Program **Cadmould Rapid** obsahuje následující položky:

- Preprocesor s přenosovým formátem STL, který provádí automatické generování výpočetní sítě konečných prvků, umožňuje zvolit polohu vtokových ústí a matematicky změnit tloušťky stěn.
- Materiálovou databázi s přehledem základních technologických parametrů pro jednotlivé skupiny materiálů.
- Procesor pro rychlý výpočet simulačních výsledků.
- Postprocesor pro zobrazení simulačních výsledků s řadou grafických prostředků včetně úprav barevného vyjádření vypočtených hodnot a možností uložení obrázků ve formátu BMP nebo PNG.

4.2. **Cadmould Fill** /7/

Program **Cadmould Fill** obsahuje všechny tyto výše uvedené položky a navíc je doplněn o možnost vytváření vtokových soustav s přesně definovanými průřezy jednotlivých částí. Tak můžeme rovněž řešit i vícenásobné formy a posoudit tak vhodnost použité vtokové soustavy.

Po provedení výpočtu simulace máme k dispozici následující výsledky:

Čelo proudící taveniny:

- časový průběh plnění
- tlaková potřeba
- teplota
- smykové napětí
- rychlost proudění

V okamžiku naplnění tvarové dutiny:

- teplota
- tlak
- smykové napětí
- rychlost proudění
- tloušťka zatuhlé vrstvy (%)

Zobrazení:

- maximálních teplot taveniny
- maximální smykové rychlosti
- nejdelší doby tuhnutí

Animace průběhů jednotlivých parametrů, zobrazení míst s uzavřeným vzduchem a polohy tokových čar.

Výpočet přídržné síly vstřikovacího stroje, posouzení technologických parametrů.

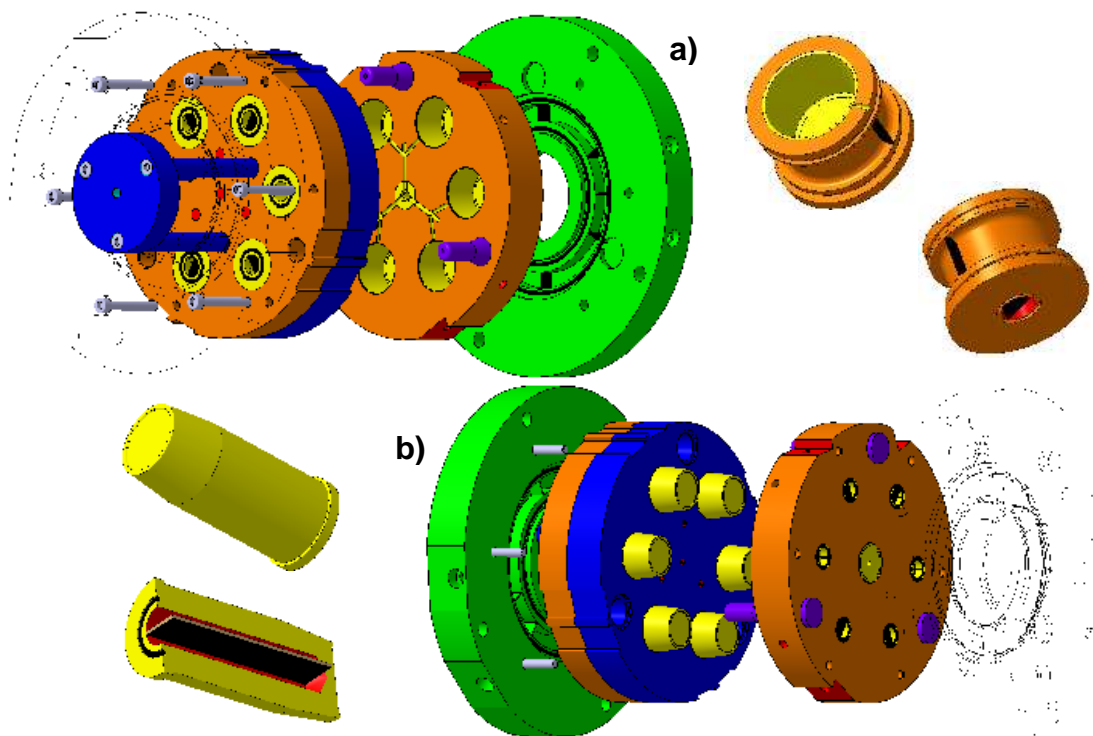
5. Experiment

Samotný proces simulace byl realizován na základě reálných výsledků získaných z diplomové práce Tomáše Poupy, strojní fakulty Technické Univerzity v Liberci magisterského studia.

Tato práce je prováděna za účelem analýzy na porovnání skutečných výsledků s výsledky ze simulačního programu Cadmould, výrobce Simcon kunststofftechnische Software GmbH. Jedná se především o vhodnosti vzduchu jako temperačního média ve formě při vstřikování plastů.

5.1. Tvorba modelu formy v Cadmould

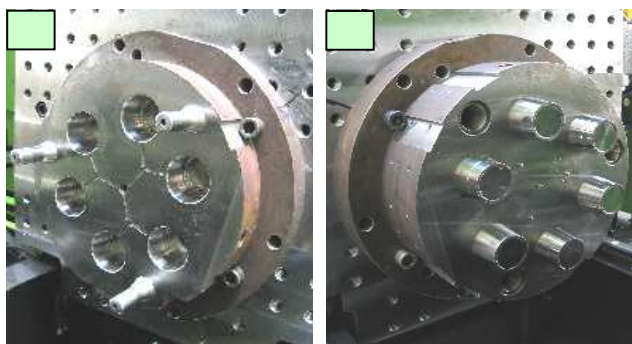
Při vytváření šestinásobné formy pro použití v programu Cadmould bylo vycházeno ze základních dat formy vytvořené v programu Catia (viz obr. 8). Po vyselektování formy daného kalíšku byla přenesena přes formát STL do Cadmouldu. Soubor kalíšku (obr.9) byl vložen přes ikonu na hlavním panelu.



Obr. 8: Schéma šestinásobné vstřikovací formy – CATIA /2/
a) pohled na pevnou část formy (nalísované tvárnice)
b) pohled na pohyblivou část formy (tvárníky)



Obr. 9: model
vstřikovaného dílu

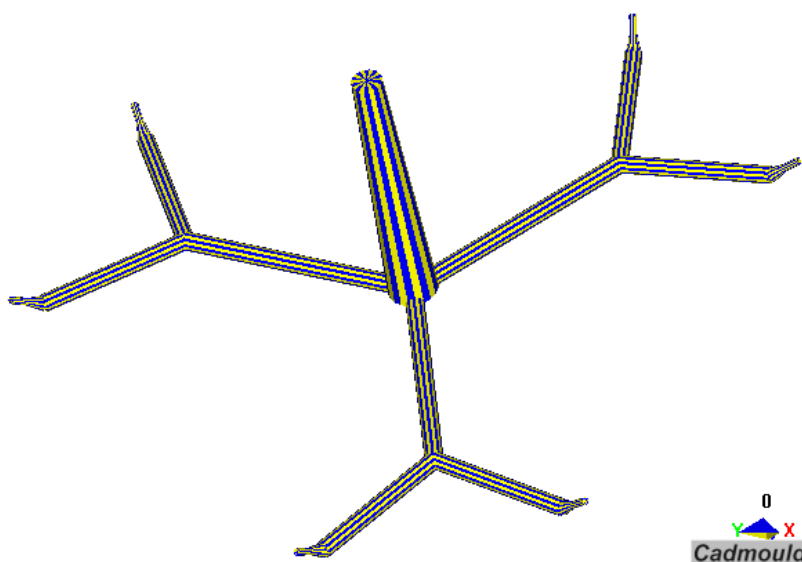


Obr. 10: Tvárnice a tvárník více násobné
vstřikovací formy /2/
a) tvárnice, b) tvárník

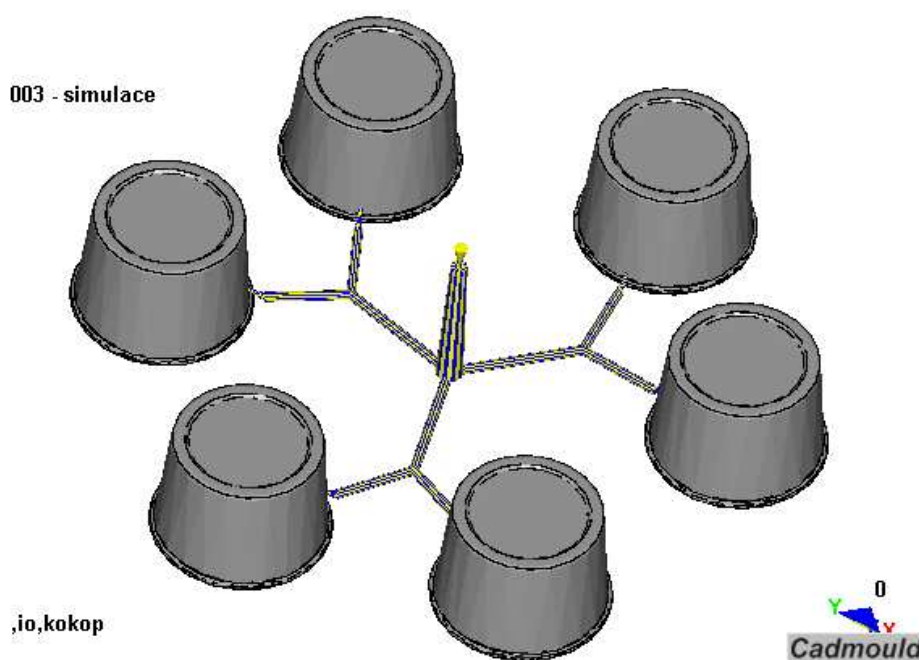
5.2. Tvorba vtokové soustavy

V následujícím kroku byla k tomuto kalíšku vytvořena vtoková soustava. Po vytvoření této soustavy byla provedena první simulace s použitím základního nastavení parametrů. Simulace probíhala pouze za účelem následného snížení času potřebného k dalším simulacím. V tomto případě se jednalo o vytvoření sítě na daném kalíšku.

V následujícím kroku byl tento kalíšek s vtokovou soustavou rozkopírován tak, aby byla vytvořena šestinásobná forma dle skutečnosti (obr. 11 a 12).



Obr. 11: model vtokové soustavy



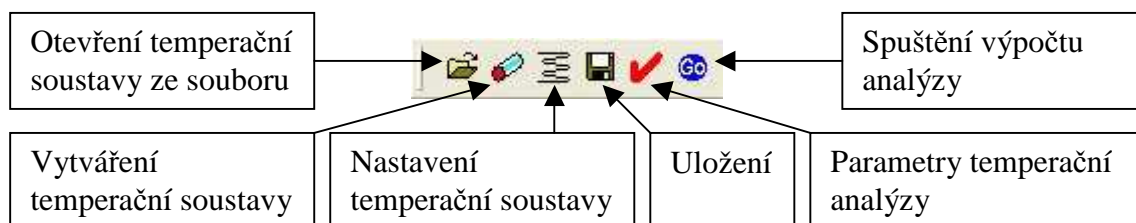
Obr. 12: model vtokové soustavy
se vstřikovanými kalíšký

5.3. Tvorba temperační soustavy

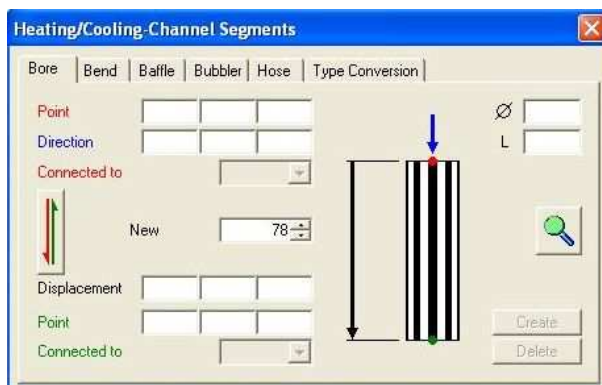
V následujícím kroku byla k této šestinásobné formě vytvořena temperační soustava. Zvolená metoda tvorby temperační soustavy byla zvolena taková, že data nebyla přímo převedena z Catie, ale pouze zjišťované různé rozměry a umístění těchto kanálů vůči jednomu konkrétnímu a polohově určenému bodu. V Cadmouldu pak dle referenčního bodu vytvořeny a umístěny potřebné kanálky (obr. 14 a 15).

Pro temperování dna kalíšku ve tvárnici a tvárníku byly vytvořeny a použity prvky s přepážkou (obr. 16). Pro propojení jednotlivých temperačních kanálů je použit model hadice (obr. 17) s přesně daným průměrem a délkou. Které se automaticky, dle nastavení programu, automaticky vytvarovaly do oblouku.

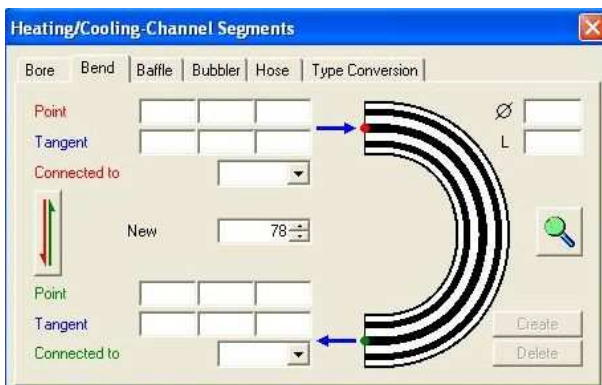
K zadávání či vytváření parametrů temperační soustavy slouží aktivní menu: Wall Temperature (obr. 13).



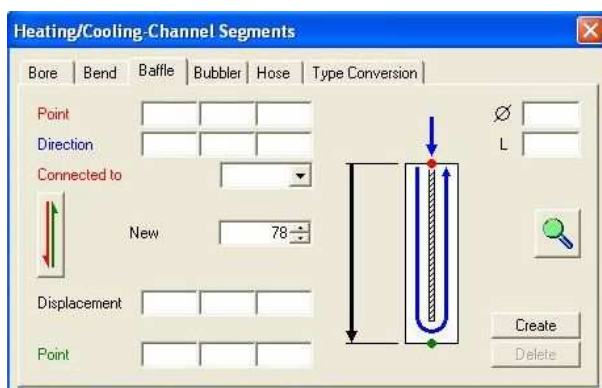
Obr. 13 hlavní menu pro temperaci forem v Cadmould



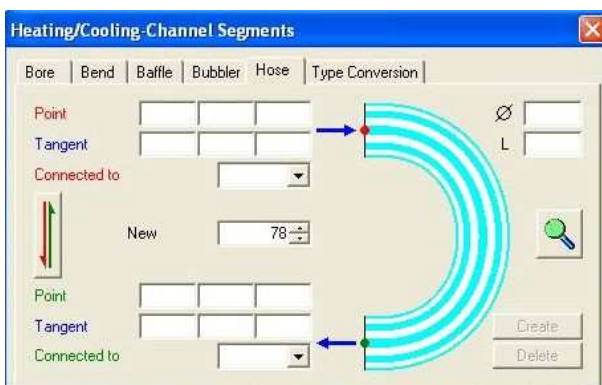
Obr. 14: tvorba rovného temperační soustavy



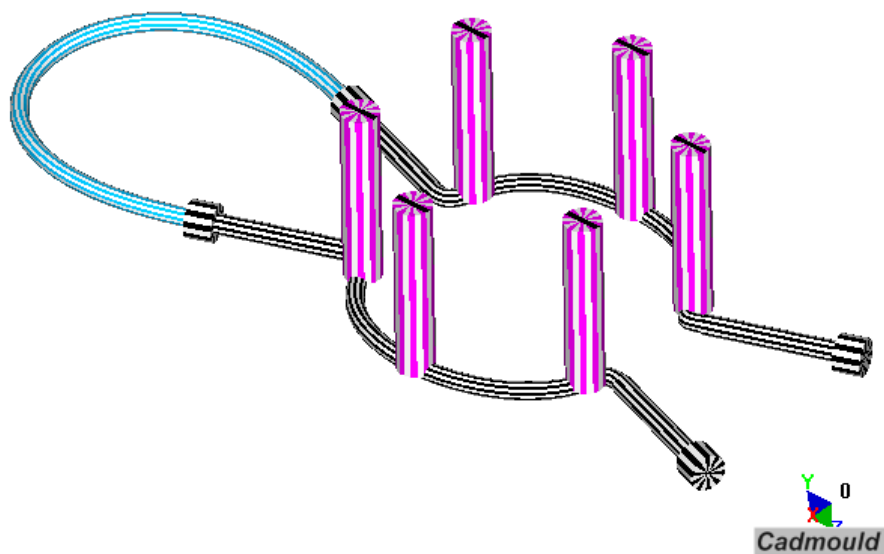
Obr. 15: tvorba obloukového úseku temperační soustavy



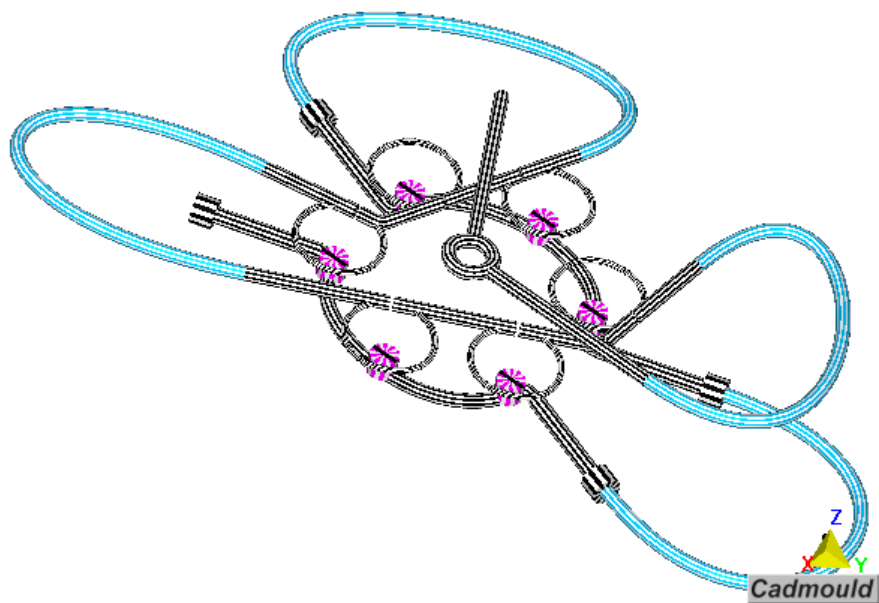
Obr. 16: tvorba trysky (temperační kanálku s přepážkou)



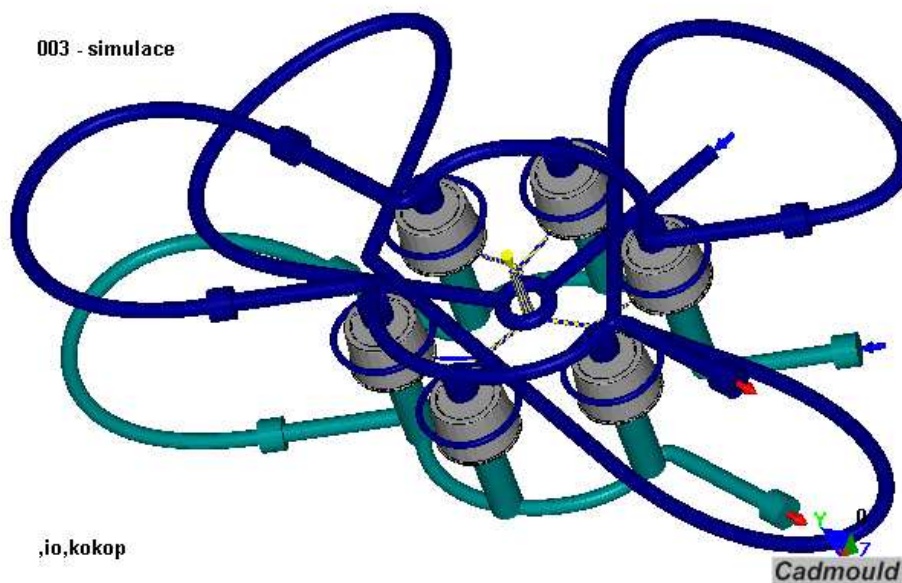
Obr. 17: tvorba hadicové části temperační soustavy



Obr. 18: temperační soustava tvárníku



Obr. 19: temperační soustava tvárnice a
vtokové soustavy



Obr. 20: model šestinásobné formy s temperační soustavou v programu Cadmould

5.4. Nastavení parametrů vstřikovacího cyklu

Pro nastavení parametrů vstřikovacího cyklu byla použita data z reálného vstřikování. Došlo ovšem k jedné změně a to v případě materiálu. Materiál, z který byl zvolen pro simulaci nesl polypropylen HF420FB. Při nastavování parametrů jej stačilo vybrat ze seznamu předdefinovaných materiálů.

Tabulka č.1 s parametry vstřikovacího cyklu

Parametr Polypropylen HF 420 FB		Temperature - voda Temperature - vzduch	
		30/30 °C 45/45 °C	30/30 °C 45/45 °C
Teploty válce	°C	250	250
Vstřikovací tlak	Mpa	35	35
Dotlak	Mpa	3	3
Doba vstřiku	S	1	1
Doba dotlaku	S	10	10
Doba chlazení	S	22	22
Doba odformování	S	47	47
Doba cyklu	S	32	32
Objem dávky	cm ³	250	250

Tabulka č.2 s vlastnostmi polypropylenu HF420FB /2/

Fyzikální vlastnosti	Podmínky	Hodnota	Jednotka	Norma
Hustota	-	910	kg/m ³	ISO 1183
Index toku	230°C/2.16 kg	120	g/10 min	ISO 1133
Modul pružnosti v ohybu	2 mm/min	1330	MPa	ISO 178
Pevnost v tahu	50 mm/min	26	MPa	ISO 527-2
Poměrné prodloužení	50 mm/min	4.2	%	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu	1 mm/min	1450	MPa	ISO 527-2
Rázová houževnatost dle Charpy	+23°C	3.4	kJ/m ²	ISO 179/1 eA
Rázová houževnatost dle Charpy	-20°C	2.0	kJ/m ²	ISO 179/1 eA
Vrubová houževnatost dle Charpy	+23°C	95	kJ/m ²	ISO 179/1 eU
Vrubová houževnatost dle Charpy	-20°C	55	kJ/m ²	ISO 179/1 eU
Tvrdost	H358/30	-	MPa	ISO 2039
Teplotní stálost	0.45 MPa	92	°C	ISO 75-2
Teplotní stálost	1.80 MPa	53	°C	ISO 75-2
Teplotní odolnost dle Vicat	A (10N)	150	°C	ISO 306
Teplotní odolnost dle Vicat	B (50 N)	73	°C	ISO 306
Doporučená teplota taveniny pro zpracování	-	220-250	°C	-
Doporučená teplota vstřikovací formy	-	30-60	°C	-

5.5. Vlastnosti temperačního média

Nastavení temperačního média vody. Voda již byla v databázi temperačních médií v programu přednastavena a nebylo třeba vypočítávat přírůstky jednotlivých hodnot veličin potřebných pro zadání dat.

Použití vzduchu jako temperačního médium není využíváno a pravděpodobně z tohoto důvodu nebyl přednastaven. Bylo nutné zjistit jeho parametry. Bylo nutno spočítat přírůstky hodnot v závislosti na vzrůstající teplotě. Jednalo se o následující přírůstky veličin: hustota (1), měrná tepelná kapacita (2), tepelná vodivost (3), kinematická viskozita (4).

Tabulka č.3 s parametry vzduchu

Teplota - t - (°C)	<u>Hustota</u> - ρ - (kg/m³)	Měrná tepelná kapacita - c_p - (kJ/kg.K)	Tepelná vodivost - l - (W/m.K)	<u>Kinematická viskozita</u> v x 10⁻⁶ (m²/s)
-150	2.793	1.026	0.0116	3.08
-100	1.980	1.009	0.0160	5.95
-50	1.534	1.005	0.0204	9.95
0	1.293	1.005	0.0243	13.30
20	1.205	1.005	0.0257	15.11
40	1.127	1.005	0.0271	16.97
60	1.067	1.009	0.0285	18.90
80	1.000	1.009	0.0299	20.94
100	0.946	1.009	0.0314	23.06
120	0.898	1.013	0.0328	25.23
140	0.854	1.013	0.0343	27.55
160	0.815	1.017	0.0358	29.85
180	0.779	1.022	0.0372	32.29
200	0.746	1.026	0.0386	34.63
250	0.675	1.034	0.0421	41.17
300	0.616	1.047	0.0454	47.85
350	0.566	1.055	0.0485	55.05
400	0.524	1.068	0.0515	62.53

Zde je uveden postup výpočtu pro jednotlivé přírůstky veličin:

Hustota:
$$\Delta \rho = \frac{\rho_1 - \rho_2}{20} \quad (^\circ\text{C}) \quad (1)$$

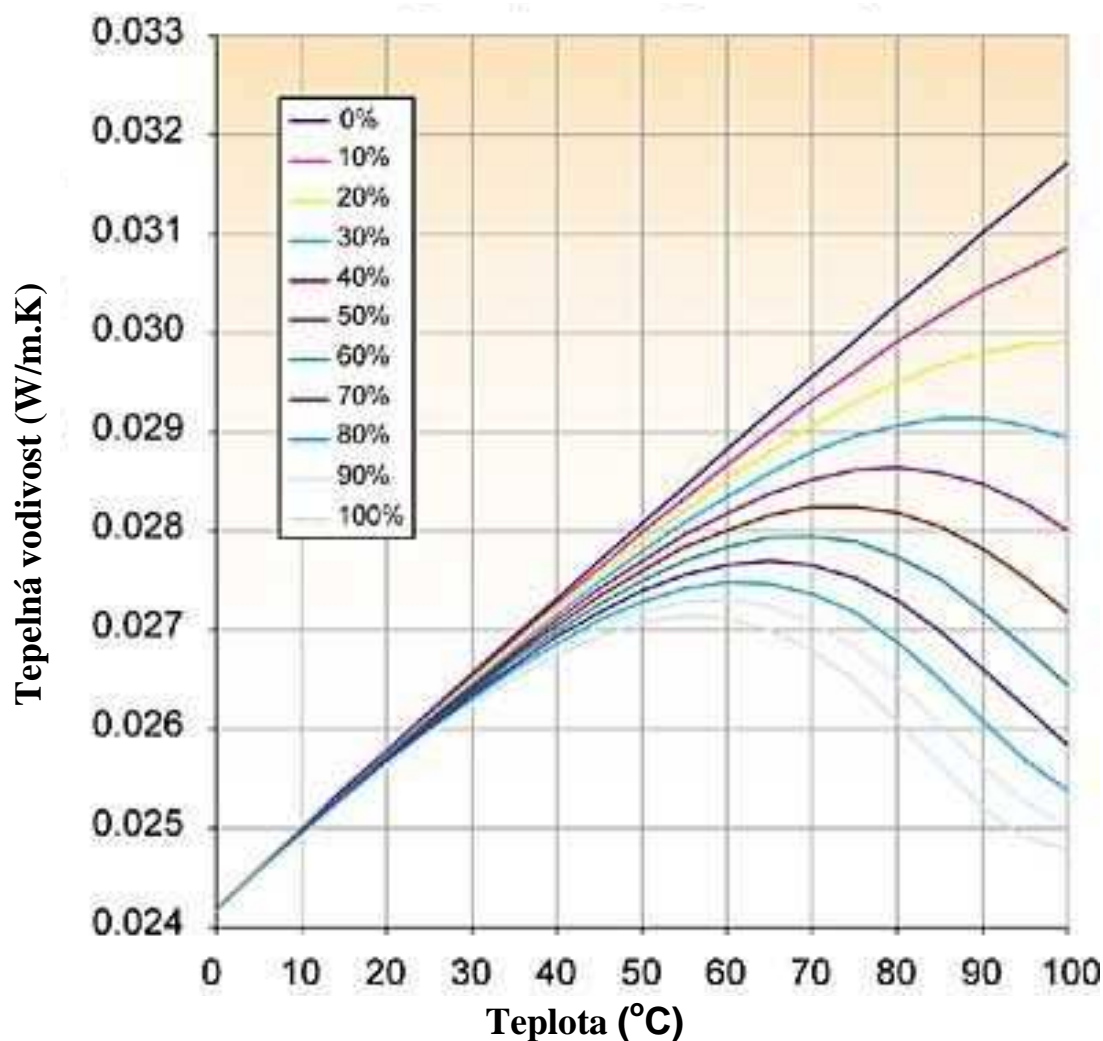
Měrná tepelná kapacita:
$$\Delta c_p = \frac{c_{p1} - c_{p2}}{20} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2)$$

Tepelná vodivost:
$$\Delta l = \frac{l_1 - l_2}{20} \quad (\text{kJ/kg.K}) \quad (3)$$

Kinematická viskozita:
$$\Delta \nu = \frac{\nu_1 - \nu_2}{20} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

Kde

- Δ je přírůstek o jeden ($^{\circ}\text{C}$)
- index 1 jsou hodnoty pro 0 ($^{\circ}\text{C}$)
- index 2 jsou hodnoty pro 20 ($^{\circ}\text{C}$)



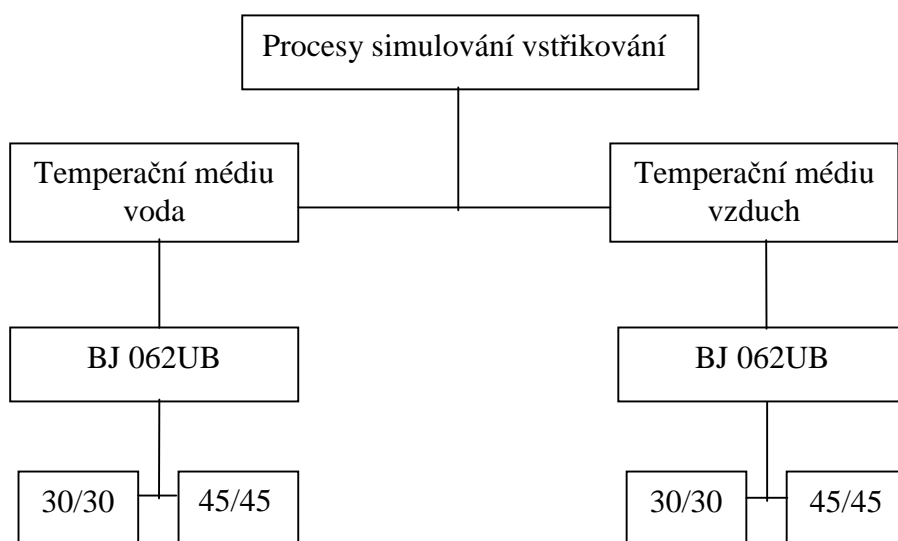
Graf č.1: závislosti tepelné vodivosti vzduchu na teplotě /9/

5.6. Nastavení parametrů chladicího média

Toto nastavení se provádí pro určení objemového průtoku temperačního média formou. Pro vzduch byla nastavena hodnota 30 litrů/vteřina, pro vodu pak 0,05 litru/vteřina. Počet vstřikovacích cyklů bylo nastaveno 40 pro temperační medium vzduch. Pro vodu to

bylo taktéž nastaveno na hodnotu 40. Ale program vygeneroval výsledek pouze pro 3 cykly vstřikování. Bylo to z toho důvodu, že jako druhý parametr ukončení byl použit rozdíl přírůstku teploty formy mezi jednotlivými vstřikovacími cykly o 1 °C. To znamená, že forma měla konstantní teplotu mezi jednotlivými cykly.

DIAGRAM PROCESŮ VSTŘIKOVÁNÍ

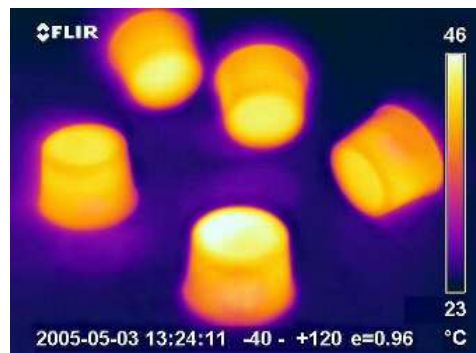


5.7. Termokamera ThermoCAM P65 /2/

Termokamera ThermoCAM P65 od firmy Flir Systems (viz obr. 3.18) byla použita k snímání povrchové teploty výrobku (viz obr. 3.19) bezprostředně po otevření formy. Infračervené záření snímané tímto zařízením bylo zpracováno v uživatelském softwaru ThermoCAM QuickView v.1.3 a vyhodnoceno se záměrem porovnat rozložení teploty na povrchu výrobku při změně způsobu temperace.



Obr. 21: Termokamera ThermoCAM P65 /2/



Obr. 22: Příklad snímku z Termokamery ThermoCAM P65 /2/

Technická data termokamery:

zobrazovací schopnost, nebo-li zorné pole při minimální ohniskové vzdálenosti je 0,6m x 0,4m x 0,3m

tepelná citlivost při 50/60Hz je 0,08°C na 30°C

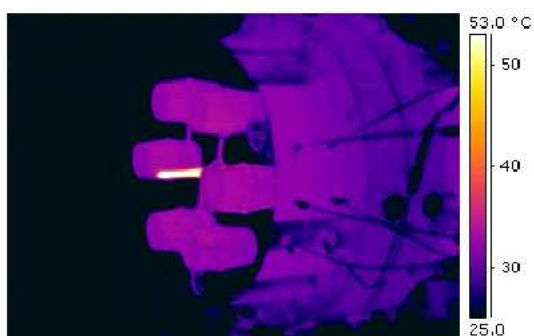
teplotní rozsah a) od - 40°C do +120°C, b) od 0°C do +500°C

přesnost $\pm 2^\circ\text{C}$ - 2%

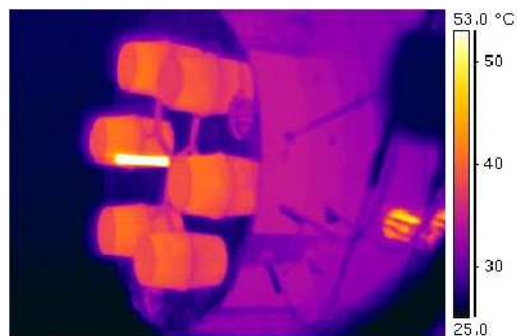
korekce emisivity je proměnná z 0,1 do 1,0. Emisivitu je možné předdefinovat dle materiálu (pro plasty $\epsilon=0,96$).

výstupní digitální formát : AVI, JPEG

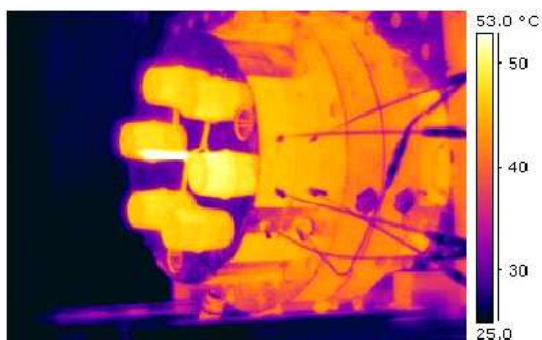
komunikace s PC pomocí univerzální sériové linky USB



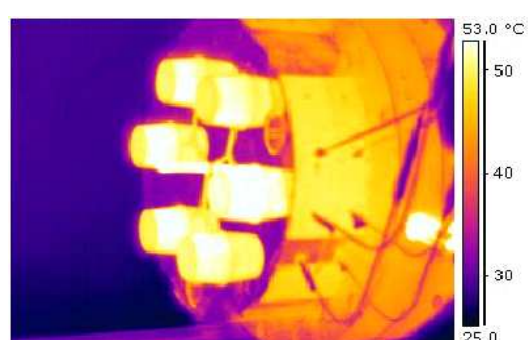
Obr. 23: Temperace vodou; 30°C /2/



Obr. 24: Temperace vzduchem; 30°C /2/



Obr. 25: Temperace vodou; 45°C /2/

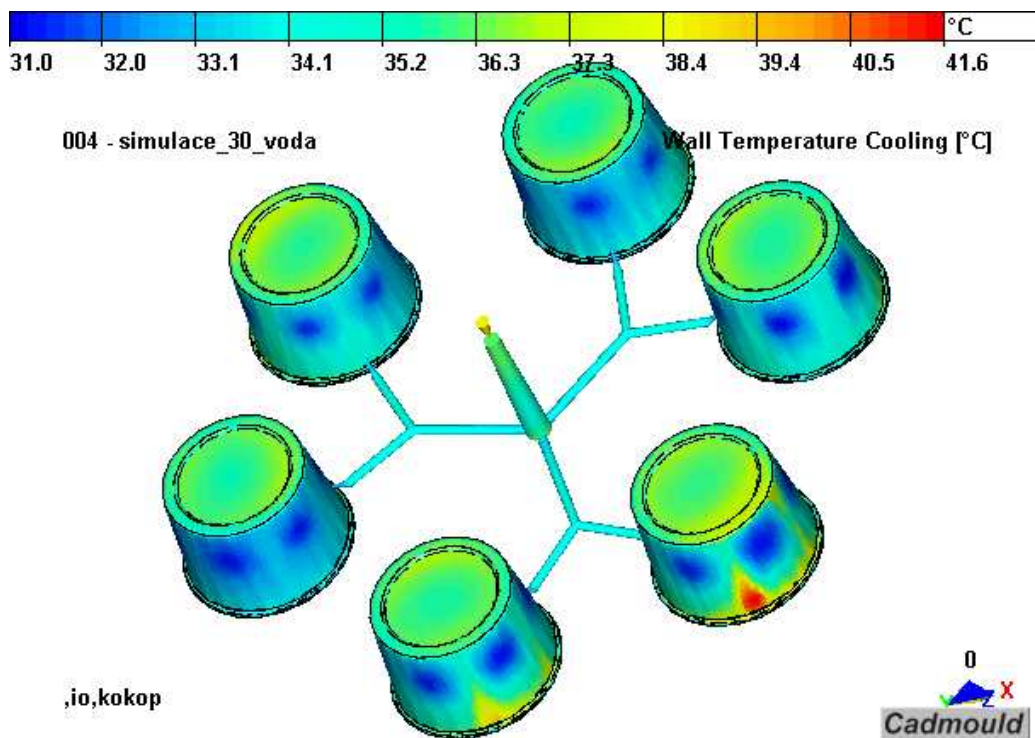


Obr. 26: Temperace vzduchem; 45°C /2/

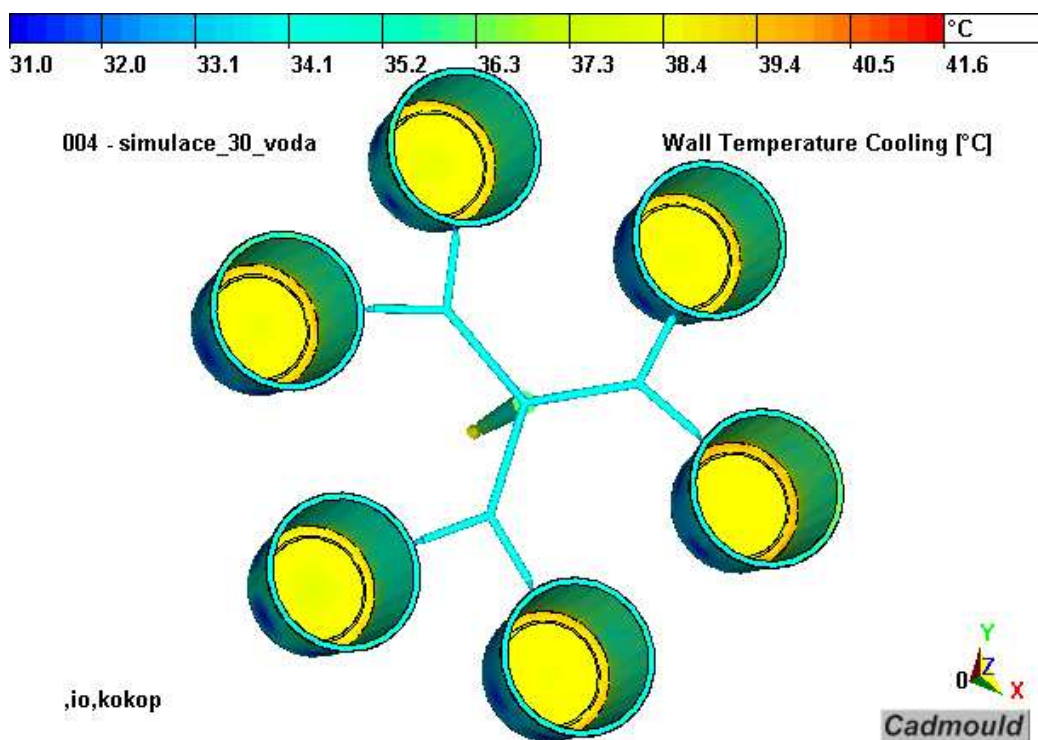
6. Povrchová teplota

Ze simulace analýzy chlazení byly získány diagramy sloužící k posouzení průběhu chladicího procesu

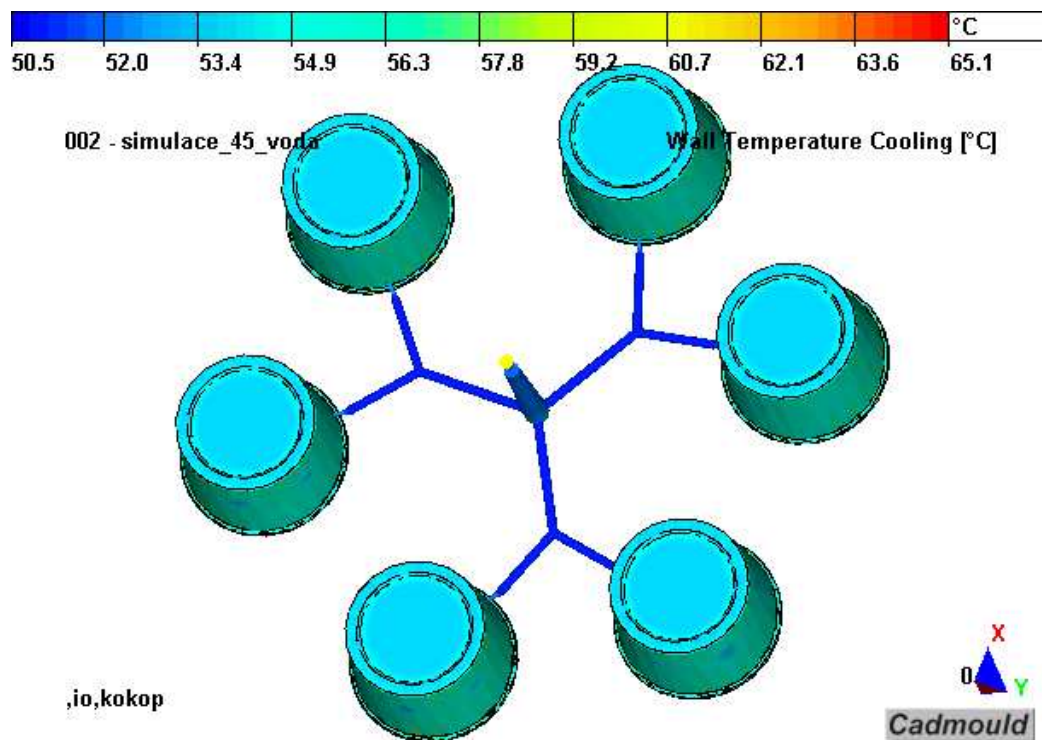
1.- Teplota povrchu – tyto diagramy jsou výsledkem teplotní analýzy. Dávají přehled o rozložení teplot na tvárnici. Pro zobrazení výsledků byl zvolen konec vstřikovacího cyklu. Na obrázcích se potvrzuje účinek rozložení chladicího okruhu. V důsledku malé tloušťky výrobku jsou teploty téměř shodné jak na povrchu, tak vně kalíšků.



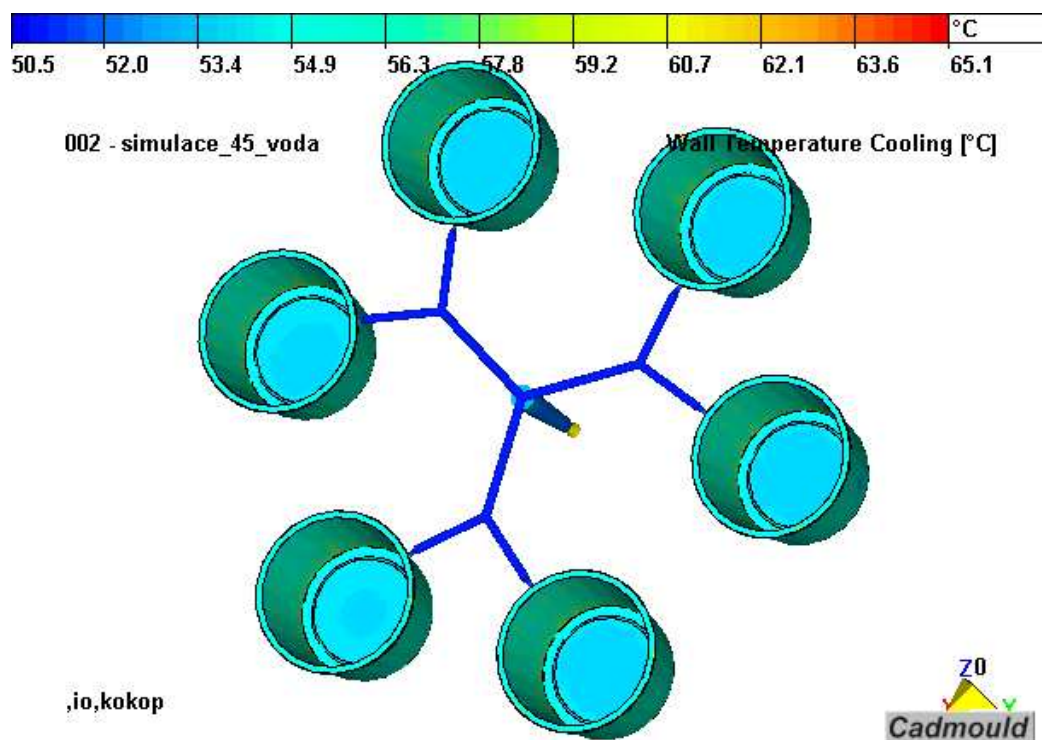
Obr. 27: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vodou 30°při pohledu na dna



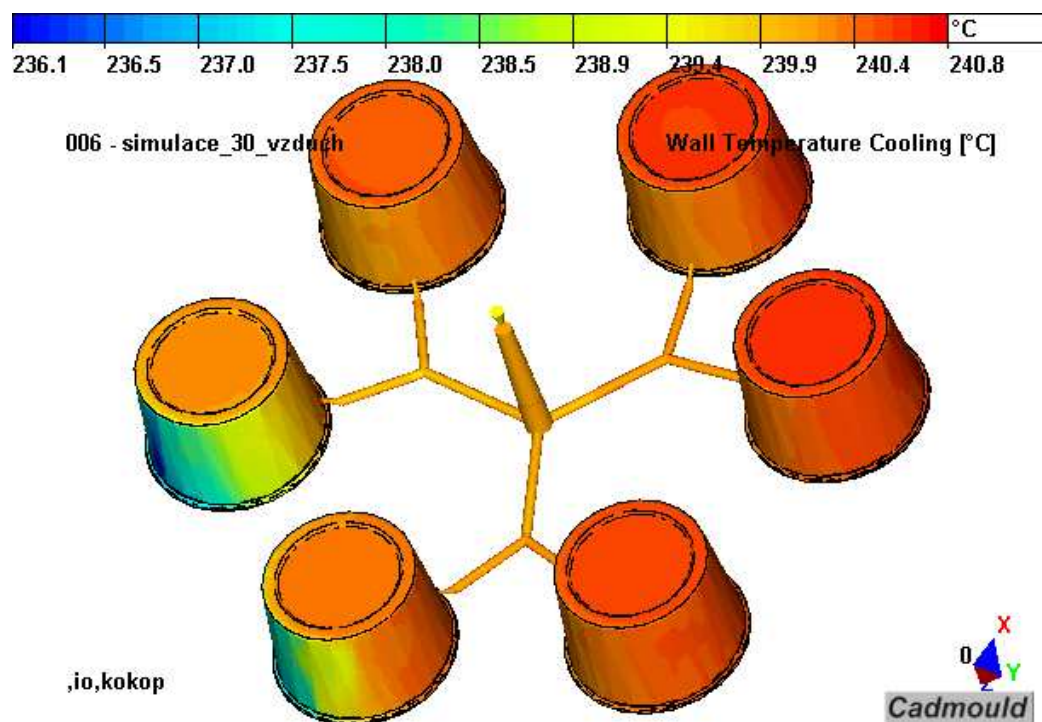
Obr. 28: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vodou 30°C p ři pohledu do kalíšků



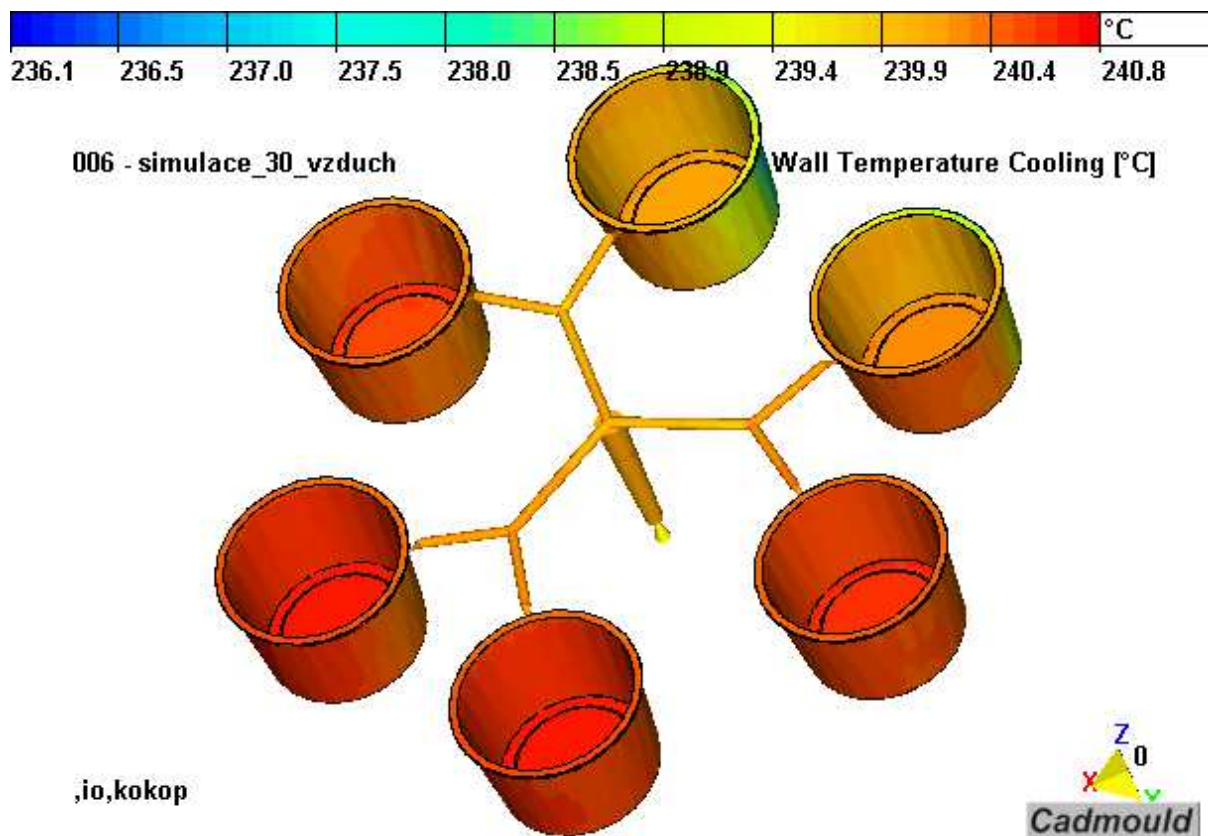
Obr. 29: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vodou 45°C p ři pohledu na dna



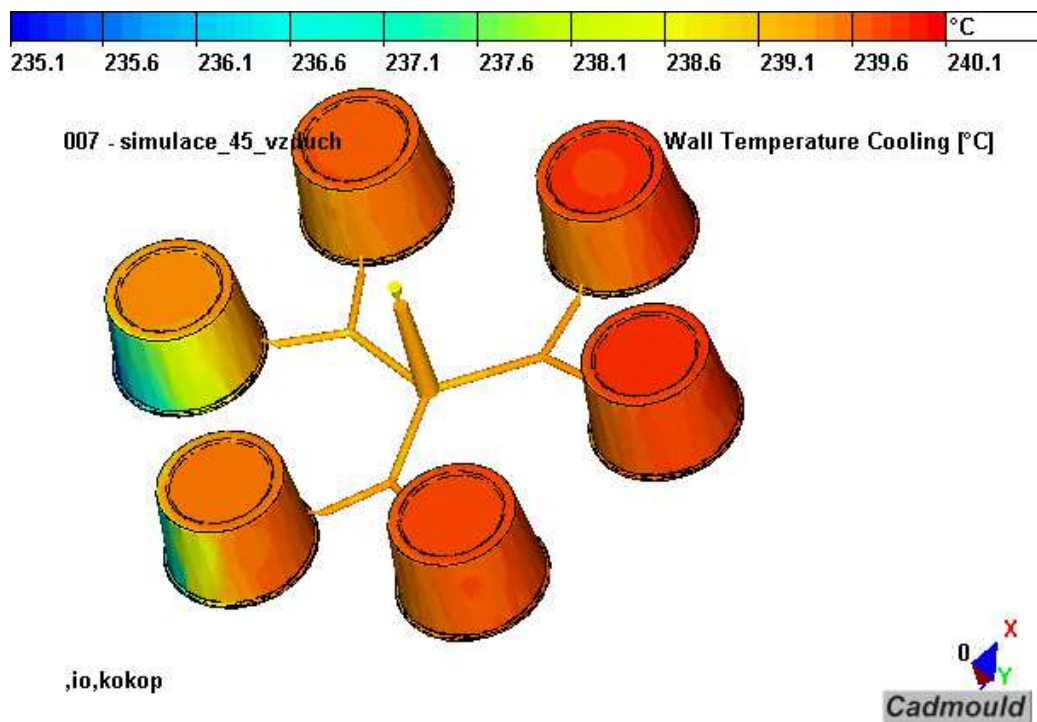
Obr. 30: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vodou 45°C p ři pohledu do kalíšků



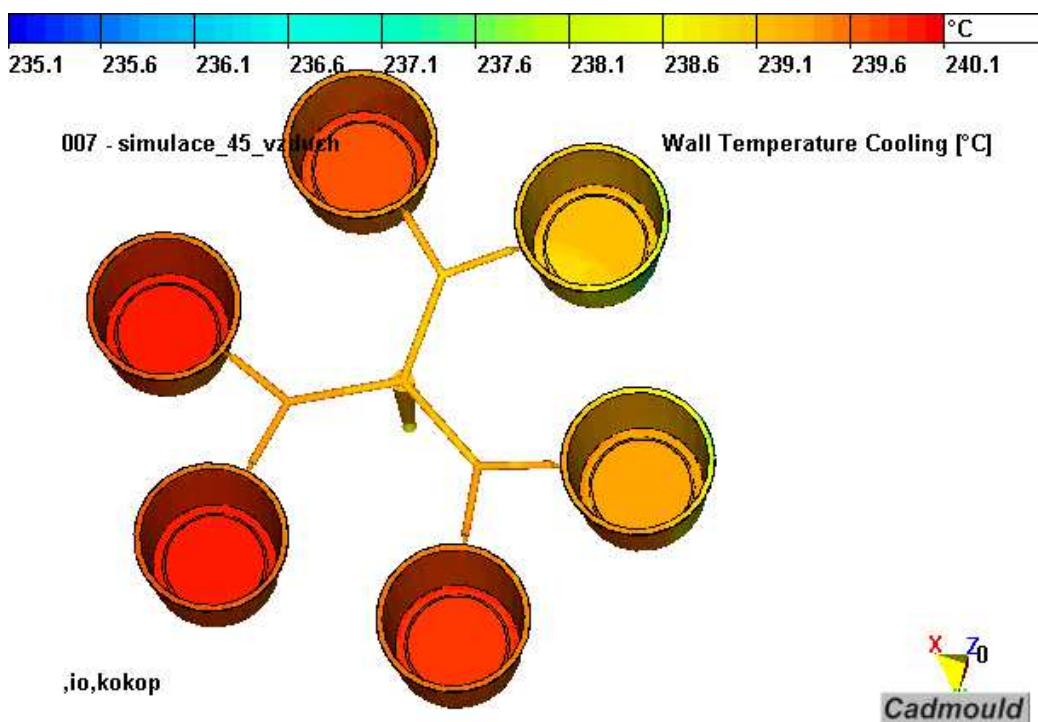
Obr. 31: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vzduchem 30°C p ři pohledu na dna



Obr. 32: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vzduchem 30°C p ři pohledu do kalíšků

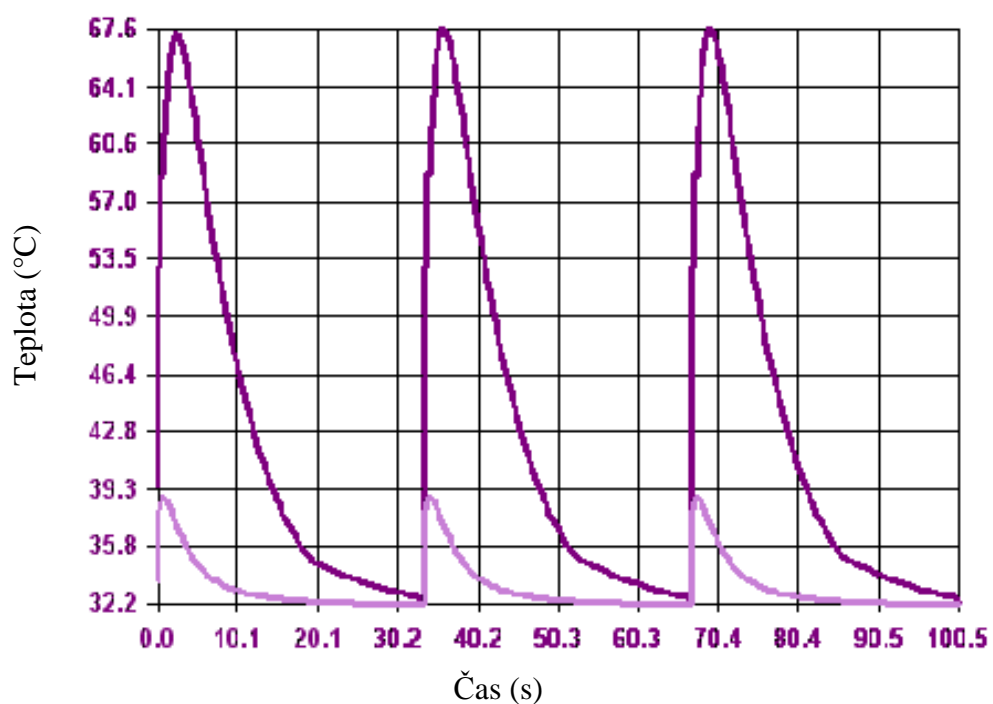


Obr. 33: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vzduchem 45°C p ři pohledu na dna

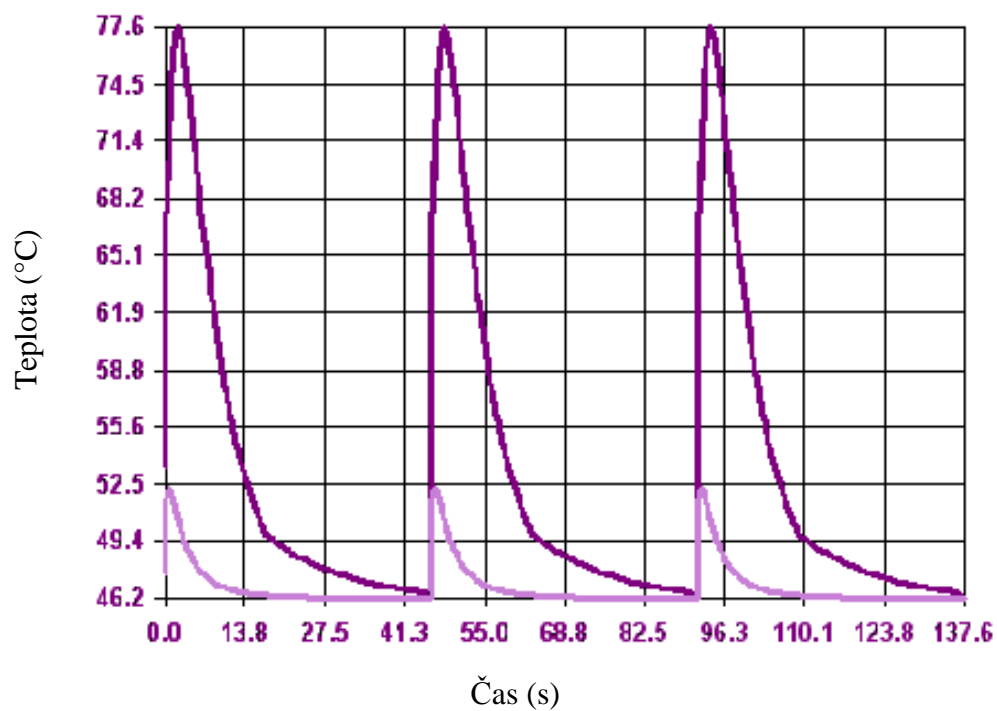


Obr. 34: Teplota povrchu kalíšků při chlazení vzduchem 45°C při pohledu do kalíšků

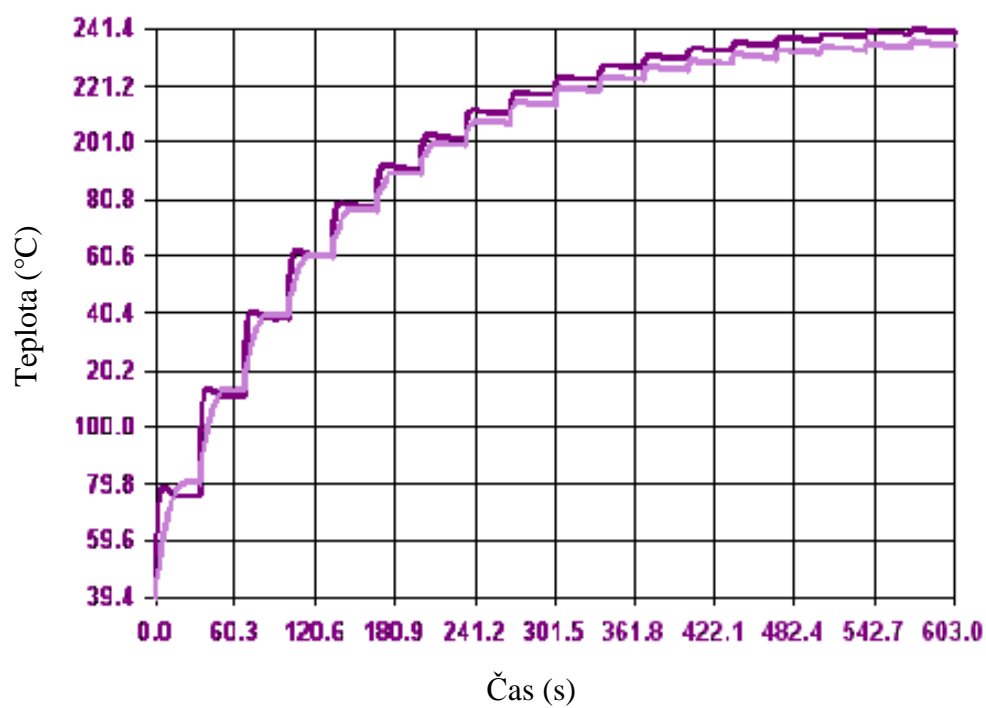
2.- Teplota součásti – tyto diagramy popisují vývoj teploty součásti v různých časech od okamžiku vstřikování. Výsledky těchto diagramů jsou spolu s procentem ztuhlé vrstvy určující pro čas vyhození výstřiku.



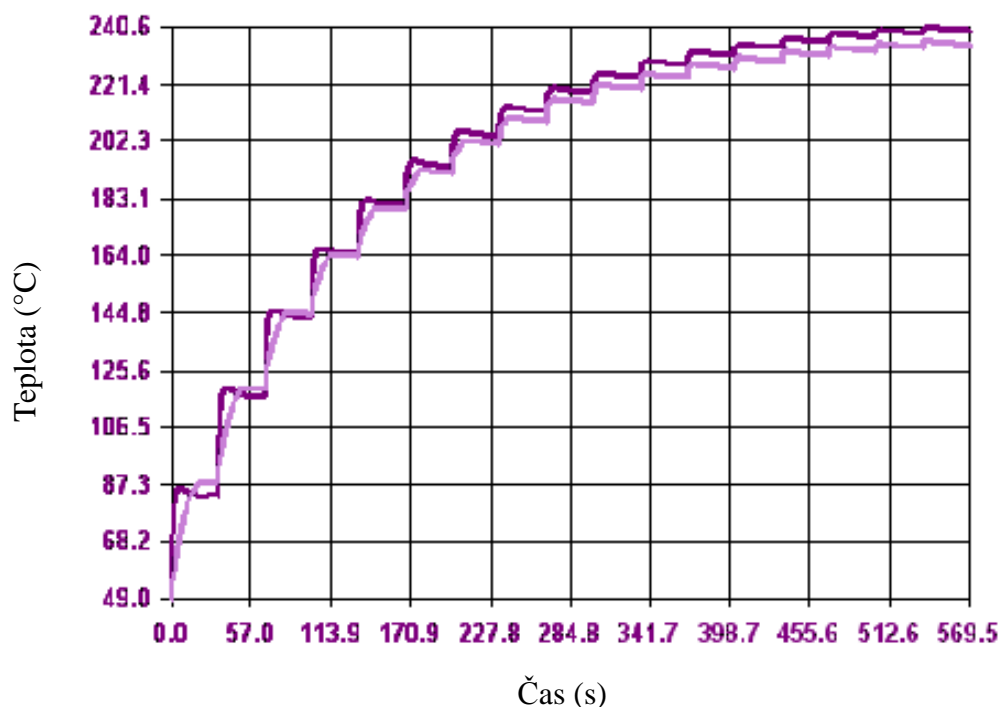
Graf č.2 závislosti teploty na čase při vstřikování – voda 30°C



Graf č.3 závislosti teploty na čase při vstřikování – voda 45°C



Graf č. 4 závislosti teploty na čase při vstřikování – vzduch 30°C



Graf č. 5 závislosti teploty na čase při vstřikování – vzduch 45°C

7. Zhodnocení

Tato diplomová práce byla napsána na téma simulace procesu vstřikování. Skládá se z teoretické a experimentální části.

V teoretické části je popsána technologie vstřikování plastů, dále hlavní faktory, které ovlivňují výslednou kvalitu výstřiku a zásady konstrukce vstřikovacích forem. Dále je v této části popsán cad-cam-cae program sloužící pro simulaci vstřikovacího cyklu.

Experimentální část je zaměřena na použití systému CADMOULD při simulaci vstřikování. Vlastní postup při simulaci je rozepsán po jednotlivých krocích. Ze získaných hodnot a grafických výstupů lze jednoduše pro jednotlivé části vstřikování učinit následující závěry.

Z příložených grafů teploty vyplývá, že vzduch o teplotě a průtoku jak bylo simulováno a zkoušeno, není vhodný pro chlazení vstřikovacích forem. Teplota formy i vstřikovaného dílu v době otevírání a vyhazování výstřiku stoupá až k teplotě roztaveného plastu při plnění dutiny formy. Dále bylo vidět, jak rozdílné chladicí účinky má i v průběhu jednoho průchodu formou během vstřikovacího cyklu. Při vstupu do formy chladí více. Poté

převeze teplo z formy a ztrácí schopnost dále chladit ve vzdálenějších místech svého temperačního okruhu.

8. Závěr

Vzduch jako temperační médium je snadno získatelný a relativně i levný. Avšak jeho vlastnosti a schopnosti pro chlazení vstřikovacích forem nejsou dostatečné za podmínek co byly simulovány a zkoušeny v souvislosti s touto prací.

LITERATURA

- /1/ Simulace procesu vstřikování s využitím systému STRIM 100, Aleš Ausperger, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1998
- /2/ Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí, Tomáš Poupa, Liberec: Technická univerzita v Liberci 2005
- /3/ www.advplast.cz
- /4/ www.vslib.cz
- /5/ www.vortex.cz
- /6/ Vliv počítačové simulace na ekonomii výroby, kvalitu forem a minimalizaci defektů u vstřikovaných plastových dílů. J. Gabriel, 1997
- /7/ www.solidvision.cz
- /8/ Tepelná bilance formy pro vstřikování plastů. Zdeněk Roman, Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1993
- /9/ www.converter.cz

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 26. května 2006

.....

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Liberec 26. May 2006

.....